

Farklı Baskı Açılı ve Dolgu Oranlarında Üretilen Polilaktik Asit Plakalarla Birleştirilmiş Yapıştırma Bağlantılarının Deneysel Analizi

Kürşat GÜLTEKİN^{1*}, Batuhan ÖZAKIN², Furkan YÜKSEL³, Emircan DANIŞMAZ⁴

Öz

Sunulan çalışmada, farklı baskı açılı ve dolgu oranlarında üretilmiş PLA bağlantı numuneleriyle üretilmiş yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğunun hasar davranışı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın motivasyonu doğrultusunda, iki farklı açıda (0° ve 45°) ve iki farklı dolgu oranında (%100 ve %75) PLA numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler kullanılarak 12,5 mm, 25 mm ve 37,5 mm bindirme uzunluğuna sahip tek tesirli bağlantı numuneleri üretilmiştir. Farklı açılı ve dolgu oranlarında üretilen bulk PLA numunelerin mekanik özellikleri ASTM D638 standardına uygun olarak çekme testi ile belirlenmiştir. Üretilen bağlantı numunelerinin mekanik özellikleri ise ASTM D1002 standardı dikkate alınarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, dolgu oranı ve baskı açısının bulk numunelerin mekanik özellikleri üzerine önemli etkisinin olduğunu, bu doğrultuda üretilen bağlantı numunelerinin hasar yüklerinin de dolgu oranı ve baskı açısına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. 0° ve 45° baskı açılarında üretilen bulk numunelerde doluluk oranının %75'den %100'e çıkmasıyla çekme dayanımlarının sırasıyla yaklaşık %6,3 ve %7,4 oranında arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, bindirme uzunluğunun artması ile hasar yükünün arttığı deneysel çalışmalardan belirlenmiştir. 0° baskı açılı ve %100 doluluk oranında PLA numuneler kullanılarak üretilen bağlantı numunelerinde, bindirme uzunluğu 12,5 mm'den 25 ve 37,5 mm'ye artmasıyla bağlantıların hasar yüklerinin sırasıyla yaklaşık %56 ve %117 oranında arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantıları, Polilaktik asit, Çekme testi, Hasar yükü.

Experimental Analysis of Adhesive Joints Bonded with Polylactic Acid Plates Produced with Different Printing Angles and Infill Ratios

Abstract

In the presented study, the effect of overlap length on the damage behavior in adhesive joints produced with polylactic acid (PLA) joint samples produced at different printing angles and filling ratios was experimentally examined. In line with the motivation of the study, PLA samples were produced at two different angles (0° and 45°) and two different infill ratios (100% and 75%). Single-lap joint samples with 12.5 mm, 25 mm and 37.5 mm overlap lengths were produced using the produced PLA samples. The mechanical properties of bulk PLA samples produced at different angles and filling ratios were determined by tensile testing in accordance with the ASTM D638 standard. The mechanical properties of the produced adhesively bonded joint PLA samples were determined considering the ASTM D1002 standard. When the results obtained were evaluated, it was observed that the filling ratio and printing angle had a significant effect on the mechanical properties of bulk PLA samples, and the failure loads of the joint samples produced in this direction also varied depending on the infill ratio and printing angle. It was determined that the tensile strengths of bulk samples produced at 0° and 45° printing angles increased by approximately 6.3% and 7.4%, respectively, as the infill ratio increased from 75% to 100%. Moreover, it has been determined from experimental studies that the failure load increases with increasing overlap length. In the joint samples produced using PLA samples with a 0° printing angle and 100% infill ratio, it was determined that the failure loads of the joints increased by approximately 56% and 117%, respectively, as the overlap length increased from 12.5 mm to 25 and 37.5 mm.

Keywords: Adhesive joints, Polylactic acid, Tensile test, Failure load.

^{1,3,4}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, kursat.gultekin@omu.edu.tr
furkanyukselimm@gmail.com emircandanismaz12@gmail.com

²Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, batuhan.ozakin@samsun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Eklemeli imalat, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verileri aracılığıyla, fiziksel parçanın katmanlar halinde oluşturulması ve ihtiyaç duyulan miktar kadar malzeme kullanılmasına dayanan imalat teknolojisidir. Eklemeli imalat, tasarımın karmaşıklığına ve detayına bağlı olarak özel ve karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanımakta ve geleneksel talaşlı imalat yöntemiyle üretilen parçaların tersine malzemelerin kesilmesi veya atılmasını gerektirmemektedir. Bu durum, malzeme tasarrufu sağlamak ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına olanak tanımaktadır. Özellikle karmaşık parçaların üretiminde eklemeli imalat, geleneksel yöntemlere kıyasla, daha kolay ve etkin maliyetli bir şekilde üretim olanağı sunmaktadır (Tofail ve ark., 2018; Daminabo ve ark., 2020; Ngo ve ark., 2018; Gao ve ark., 2015)

Günümüzde; seçici lazer ergitme (SLE), seçici lazer sinterleme (SLS), elektron ışık ergitme (EBM), eriyik yığma modelleme (FDM/EYM) vb. gibi, çok sayıda eklemeli imalat yöntemleri mevcut olup, bu yöntemler kullanılan malzeme, tabakaların oluşturulması ve çalışma prensipleri açısından farklılıklar göstermektedir (Özsolak, 2019). Eriyik yığma modelleme (EYM) teknolojisi uygun maliyetli ve kullanımı kolay olduğu için ev kullanıcılarından endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. EYM teknolojisi, polimerik malzemenin sıcak bir nozuldan geçirilmesi sonucu ertirilmesi ve ardından erimiş malzemenin tabakaları oluşturacak şekilde önceden belirlenmiş bir yolda hareket etmesi ile parçanın katmanlı üretilmesi esasına dayanmaktadır (Penumakala ve ark., 2020; Rajan ve ark., 2022; Dhinakaran ve ark., 2020). EYM yönteminde, genellikle yüksek sıcaklıkta eritilen ve ardından soğuyup katılaştıran özelliklere sahip termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Polilaktik Asit (PLA), Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS), Polietilen Tereftalat Glikol (PETG), Termoplastik Poliüretan (TPU), Polikarbonat ve Nylon üretilen parçanın gereksinimlerine ve amacına bağlı olarak tercih edilen malzemelerdir (Khan ve ark., 2023; Zhou ve ark., 2023; Kumar ve ark., 2022; Desai ve ark., 2023). Polilaktik asit (PLA), büyük boyutlu modelleri basarken düşük büzülme oranına ve iyi stabiliteye sahip olması, biyolojik olarak bozunabilmesi, hafif ve dayanımı yüksek olması gibi avantajları sayesinde üç boyutlu (3B) baskı teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Brancewicz-Steinmetz ve ark., 2021).

EYM yönteminde; seçilen ekstrüzyon sıcaklığı, baskı açısı, yazdırma boşluğu, tabaka kalınlığı, baskı hızı ve dolgu oranı gibi parametreler üretilen parçanın dayanımında önemli rol oynamaktadır. Kaygusuz ve Özerinç (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı nozul (ekstrüzyon) sıcaklığı ve baskı doluluk oranlarının PLA ile üretilen malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Nozul sıcaklığının artmasıyla yapıdaki boşlukların azaldığını ve bunun sonucunda da çekme dayanımının arttığını, dolgu oranının azalmasıyla da dayanım ve elastisite modülünün azaldığını ifade etmişlerdir. Öz ve ark., (2018) tarafından yapılan bir çalışmada ise, baskı doluluk

oranının farklı filamentler kullanılarak üretilen numunelerin hasar yüklerine olan etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm filament çeşitlerinde baskı doluluk oranlarındaki artışın hasar yükünü arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca, Polistiren filament ile üretilen numunelerde dolgu oranına bağlı olarak en belirgin farkın meydana geldiği ifade edilirken, Nylon filament için ise dolgu oranının diğer filamentlere kıyasla hasar yüküne etkisinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Kamer ve Temiz (2021), farklı tabla ve nozul sıcaklıklarının ABS ve PLA malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisini inceledikleri deneysel çalışmada; tabla sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde çok büyük etkisinin olmadığını ancak nozul sıcaklığının azalmasıyla çekme dayanım değerlerinin azaldığını ifade etmişlerdir. Kamer ve ark., (2022) farklı baskı hızlarının PLA numunelerin mekanik özellikleri üzerine etkisini inceledikleri bir başka çalışmada ise, baskı hızının artmasıyla üst yüzeydeki sertlik değerlerinin ve çekme dayanımının azaldığını, gözenekliliğin ise arttığını bildirmişlerdir. Algarni (2021), 0°, 45° ve 90° baskı tarama (raster) açılarında ürettiği PLA malzemelerin mekanik özelliklerini incelediği çalışmada, baskı açısının çekme dayanımı üzerinde önemli etkisinin olduğunu, 90° (çekme yönüne paralel) açıda üretilen numunelerde maksimum çekme dayanımının elde edildiğini ifade etmiştir.

EYM teknolojisiyle plastik ham maddeler kullanılarak üretilen parçaların birleştirilmesi önem arz etmektedir. Plastik malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi ön plana çıkmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, bu konuda çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. Polat Çoban ve ark., (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı yapıştırıcılar kullanılarak üretilen tek tesirli PLA bağlantılarında dolgu oranı, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırılan malzemenin yüzeyine uygulanan farklı boyutlardaki zımparalama işleminin etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının, yapıştırıcı türünün ve yapıştırılan yüzeye uygulanan zımparalama işlemlerinin bağlantıların dayanımını etkilediği ifade edilmiştir. Anaç ve ark., (2022), %20 ve %100 doluluk oranlarında, farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip PLA malzemeleri farklı basınç yöntemleri kullanarak ürettikleri tek tesirli bağlantılarda, basınç türünün önemli olduğunu ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak uygun basınç türünün seçilmesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Khosravani ve ark., (2021) baskı parametrelerinin ve yapıştırıcı kalınlığının bağlantıların mekanik performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneysel olarak kullanılan farklı yapıştırıcı kalınlıkları (0,2, 0,3 ve 0,4 mm) arasında, 0,2 mm yapıştırıcı kalınlığının daha yüksek mekanik performans sergilediği belirlenmiştir. Choudhury vd. (2021), yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bambu elyafı/PLA kompozit bağlantıların çekme ve basma performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırma bulgularına göre, bağlantı numunesinin genişlik ve bindirme uzunluğunun artması ile numunelerin daha iyi çekme ve basma dayanımı sağladığı bildirilmiştir.

Sunulan çalışmada, 0° ve 45° derece baskı açılarında, %100 ve %75 dolgu oranlarında üretilen PLA plakalarla birleştirilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğunun etkisi, baskı

açısı ve dolgu oranının bulk numunelerin mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, hem bulk hem de bağlantı numuneleri üretilmiş ve çekme testi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

PLA filament 3B baskı teknolojisinde sıklıkla kullanılan ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir termoplastiktir. Sunulan çalışmada, kullanım kolaylığı, düşük maliyet ve çevre dostu olması gibi özellikleri nedeniyle PLA filament kullanılmıştır. Kullanılan filament, Filameon firmasından (Kayseri, Türkiye) temin edilmiş olup, üretici firmanın katalogunda sunulan teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Filamentin özellikleri

Çap	1,75 mm
Yoğunluk	1,24 g/cm ³
Rockwell Sertliği	108
Baskı Sıcaklığı	190-230 °C
Çekme Dayanımı	53 MPa
Uzama Gerinimi	%6
Eğme Dayanımı	83 MPa

Tek tesirli PLA bağlantı numunelerini birleştirmek için Araldite 2011 epoksi yapısal yapıştırıcısı kullanılmıştır. Çift bileşenli Araldite 2011 yapıştırıcısı epoksi ve sertleştiriciden (1:0,8 oranında) oluşmakta ve 60°C’de 75 dakika sürede kürleşmektedir (Gültekin ve Korkmaz, 2021; Korkmaz ve Gültekin, 2023). Kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri literatürden alınmış (Özer ve Erbayrak, 2016; Carbas ve ark., 2014) ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Yapıştırıcının mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	Poisson Oranı (ν)	Elastisite Modülü
33 MPa	0,41	1600 MPa

2.2. Numunelerin Hazırlanması

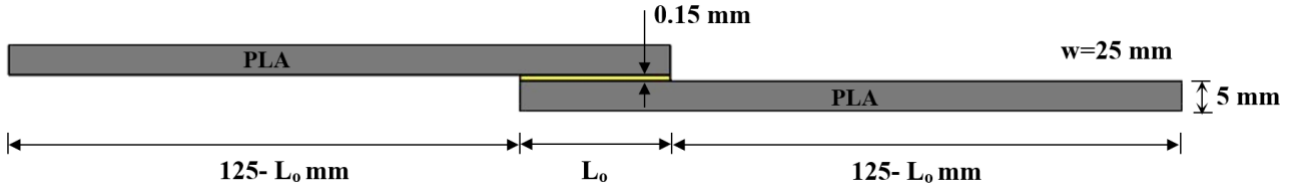
Yapıştırılacak PLA plakalar ve bulk PLA numuneler Creality Ender 3 V2 masa üstü tipi 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Plakaların üretiminde; ekstrüzyon sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C ve katman kalınlığı 0,12 mm olarak seçilmiştir. %100 ve %75 dolgu oranlarında, 0° ve 45° baskı açılarında bulk ve bağlantı numuneleri üretilmiştir (Şekil 1). Üretilen PLA bulk ve plaka

numuneler yapıştırma ve test sürecine kadar nem ve sıcaklıktan etkilenmemesi için desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.



Şekil 1. Üretilen bulk PLA ve yapıştırma bağlantı numuneleri

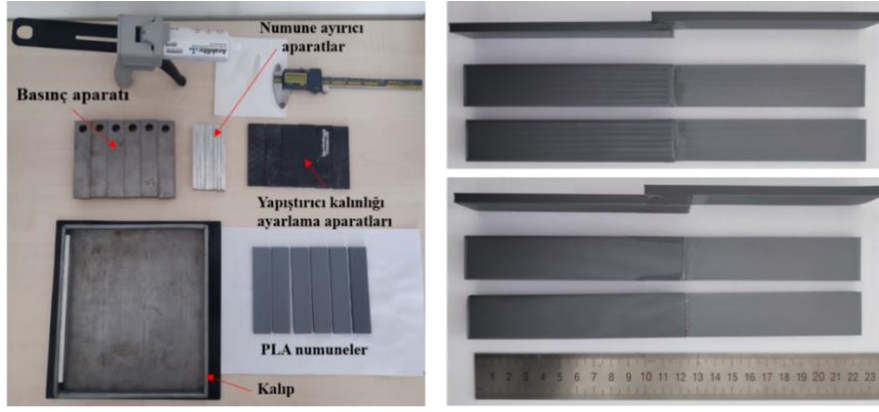
PLA numuneler üretildikten sonra, tek tesirli bağlantı numunelerinin üretim aşamasına geçilmiştir. Üretilecek tek tesirli bağlantı geometrisi Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Çalışma kapsamında tek tesirli bağlantı numunelerinin genişliği 25 mm, bindirme uzunluğu (L_0) ise 12,5, 25 ve 37,5 mm olarak üretilmiştir.



Şekil 2. Bağlantı geometrisi

Bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı kalınlığını ayarlamak için kalıp ve kalıp aparatları kullanılmıştır. Kalıp ve kalıp aparatları önce silikon yağlayıcı ile kaplandıktan sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir. PLA plakaların yüzeyi yapıştırma işlemi öncesinde izopropil alkol ile temizlendikten sonra, yapışma bölgesine yapıştırıcı tabancası yardımıyla yapıştırıcı uygulanmıştır. Uygun kalıp aparatları vasıtasıyla yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu ayarlanan numuneler, 60°C etüv içerisinde 75 dakika bekletilerek kürleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kürleşme işlemi sonrası, numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve ardından yapışma bölgesi etrafında taşan yapıştırıcılar maket bıçağı yardımıyla temizlenmiştir (Şekil 3).

Üretilen bağlantı numunelerine ait deneysel parametreler Tablo 3’te verilmiştir.

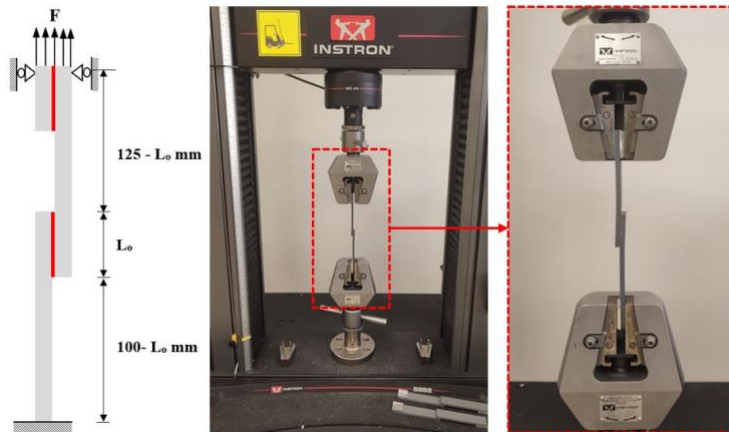


Şekil 3. Bağlantı numunelerinin üretimi

Tablo 3. Deneysel parametreler

Bindirme Uzunluğu	Dolgu Oranı	Baskı Açısı	Numune Kodu
12,5 mm	% 100	0°	B-1/100/0
25 mm	% 100	0°	B-2/100/0
37,5 mm	% 100	0°	B-3/100/0
12,5 mm	% 75	0°	B-1/75/0
25 mm	% 75	0°	B-2/75/0
37,5 mm	% 75	0°	B-3/75/0
12,5 mm	% 100	45°	B-1/100/45
25 mm	% 100	45°	B-2/100/45
37,5 mm	% 100	45°	B-3/100/45
12,5 mm	% 75	45°	B-1/75/45
25 mm	% 75	45°	B-2/75/45
37,5 mm	% 75	45°	B-3/75/45

Üretilen farklı dolgu oranlarındaki bulk numuneler Shimadzu marka çekme testi cihazında, oda sıcaklığında 5 mm/dk çekme hızında test edilmiştir. Bağlantı numuneleri ise Instron marka çekme cihazında, oda sıcaklığında 1 mm/dk çekme hızında test edilmiştir. Her bir parametreden 3 adet numune test edilmiştir. Çekme testine ait sınır şartları ve test cihazı Şekil 4’te verilmiştir.

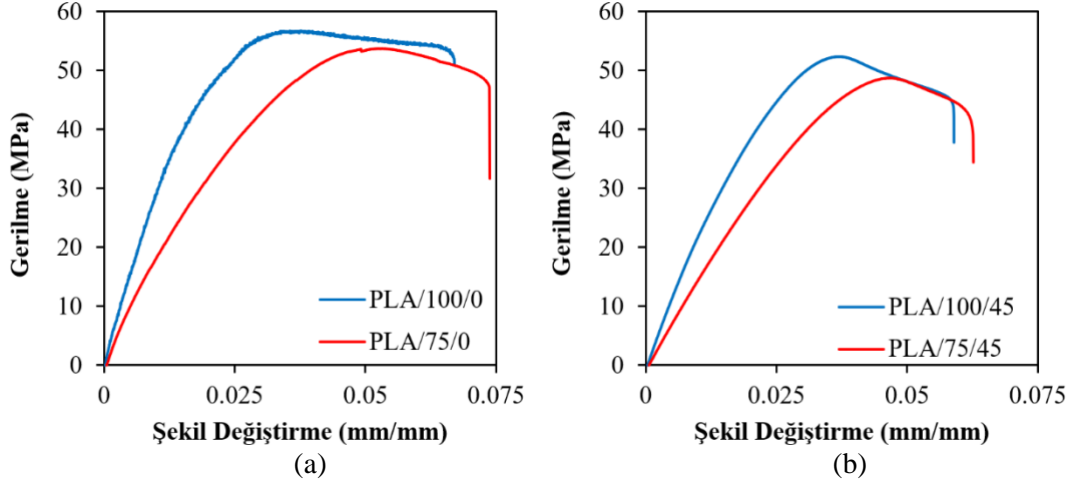


Şekil 4. Bağlantı numunelerine ait sınır şartları ve çekme testi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Bulk PLA Numunelerinin Çekme Testinden Elde Edilen Sonuçlar

%100 ve %75 dolgu oranlarında, 0° ve 45° baskı açılarında bulk PLA numunelerinin çekme testi sonrası elde edilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. PLA numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri; a) 0° , b) 45°

Çekme testi sonrasında elde edilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden, %100 ve %75 dolgu oranlarında, 0° ve 45° baskı açılarında üretilen bulk PLA numunelerinin çekme dayanımı, maksimum şekil değiştirme ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların ortalama değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. PLA bulk numunelerinin mekanik özellikleri

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Şekil Değiştirme (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
PLA/100/0	57,1	0,0671	3055
PLA/75/0	53,7	0,0738	2190
PLA/100/45	52,3	0,0589	2465
PLA/75/45	48,7	0,0626	1590

Şekil 5 ve Tablo 4'te verilen PLA bulk numunelere ait mekanik özellikler incelendiğinde; dolgu oranının azalmasıyla malzemelerin çekme dayanımlarının ve elastisite modüllerinin azaldığı, maksimum şekil değiştirme değerlerinin ise arttığı görülmektedir. %100 dolgu oranı ve 0° baskı açısında üretilen numune (PLA/100/0) ile %75 dolgu oranı ve 0° baskı açısında (PLA/75/0) üretilen numune kıyaslandığında, dolgu oranının %100'den %75'e inmesiyle çekme dayanımının ve elastisite modülünün sırasıyla yaklaşık %6 ve %28 oranlarında azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte aynı numuneler birbirleriyle kıyaslandığında, maksimum şekil değiştirme değerlerinde ise tam aksine %10 oranında artış meydana geldiği görülmektedir. PLA malzemelerde dolgu oranının azalmasıyla

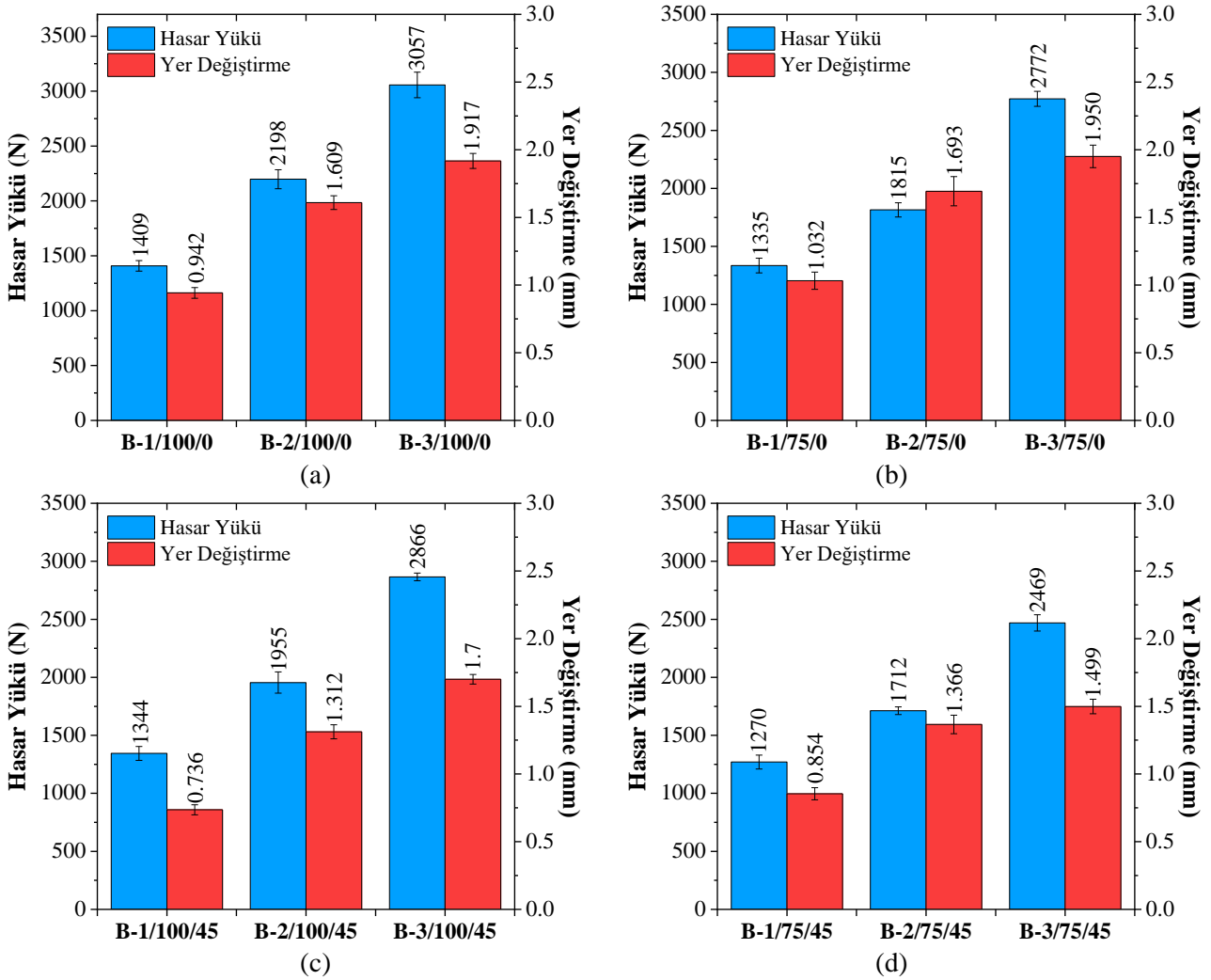
birlikte, malzemenin içindeki dolgu maddesinin miktarı ve malzemenin yapısal bütünlüğü azalmaktadır. Ayrıca, dolgu oranı malzemenin içinde kuvvetlerini dağıtarak homojen bir yük transferi sağlamaktadır. Dolgu oranının azalmasıyla birlikte, dolgu maddesinin miktarı azalmakta ve bunun sonucunda da homojen yük dağılımı etkilenmektedir. Bu da çekme gerilmesinin azalmasına neden olmaktadır.

Baskı açısının PLA numunelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. %100 ve %75 dolgu oranlarında, 0° ve 45° baskı açılarındaki numuneler kendi aralarında kıyaslandığında, baskı açısının 0° olduğu numunelerin daha yüksek mekanik performans sergilediği görülmektedir. %100 dolgu oranında, 0° ve 45° baskı açılarındaki üretilen numuneler kıyaslandığında, 0° baskı açısındaki numunenin (PLA/100/0) çekme gerilmesinin 45° açıda üretilen numuneye (PLA/100/45) kıyasla yaklaşık %9 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, PLA/100/0 malzemenin elastisite modülünün ise PLA/100/45 numuneye kıyasla yaklaşık %24 daha fazla olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. 0° baskı açısındaki PLA numunelerde filamentlerin yönü ile çekme yönü aynı olduğundan, 0° baskı açısındaki PLA numuneler daha fazla yük taşımakta ve bu da mekanik özellikler üzerinde olumlu etki sağlamaktadır. Anizotropik malzemelerde fiberlerin yerleştirilme yönü, malzemenin mukavemeti, rijitliği ve diğer mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir faktördür. Fiberlerin yerleştirme yönüyle çekme yönünün aynı olması, dış kuvvetlerin en etkin şekilde fiberler aracılığıyla malzeme içinde taşınmasını sağlar. PLA numunelerde de filamentlerin çekme yönünde olması durumunda malzemelerin mukavemet ve rijitlikleri daha yüksek olmaktadır. Sonuç olarak, üretimde filamentlerin yönüyle çekme yönünün aynı olması, PLA malzemelerin çekme yönünde daha yüksek mukavemet, rijitlik ve dayanıklılık kazanmasına yardımcı olmaktadır. PLA bulk numunelerden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, en iyi mekanik özelliklerin %100 dolgu oranında ve 0° baskı açısında üretilen numunede elde edildiği görülmektedir.

3.2. Bağlantı Numunelerinin Çekme Testinden Elde Edilen Sonuçlar

%100 ve %75 dolgu oranlarında, 0° ve 45° baskı açılarındaki PLA bulk numuneler kullanılarak üretilen 12,5, 25 ve 37,5 mm bindirme uzunluğuna sahip tek tesirli bağlantı numunelerinin çekme testi sonrası elde edilen ortalama hasar yükleri ve yer değiştirme (uzama) değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bağlantıların hasar yüklerinin bindirme uzunluğu, yapıştırılan malzemenin dolgu oranı ve baskı açısına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. %100 dolgu oranında ve 0° baskı açısında üretilen bağlantı numunelerinin çekme testi sonrası elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, 25 mm bindirme uzunluğuna sahip bağlantının (B-2/100/0) ortalama hasar yükünün 12,5 mm bindirme uzunluğuna sahip numuneye (B-1/100/0) kıyasla yaklaşık %56

oranında arttığı görülmektedir. Bindirme uzunluğu 37.5 mm olan numune ise (B-3/100/0), 12,5 ve 25 mm bindirme uzunluğuna sahip numuneye kıyasla sırasıyla yaklaşık %117 ve %39 oranında arttığı belirlenmiştir. Hasar yüklerinin bindirme uzunluğuna bağlı olarak sergilediği artış trendi %75 dolgu oranında, 0° ve 45° baskı açılarındaki numunelerde de görülmektedir. Yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırılan yüzey alanı artmaktadır. Daha fazla yapışma alanı ise bağlantılarda daha fazla yüzey teması sağlamaktadır. Bu yüzey teması, bağlanacak malzemeler arasında daha fazla temas noktası oluşturarak daha fazla kuvvet dağılımı sağlamaktadır. Bunun sonucunda, bağlantı daha homojen hale gelmekte ve daha sağlam bir bağ oluşturmaktadır.



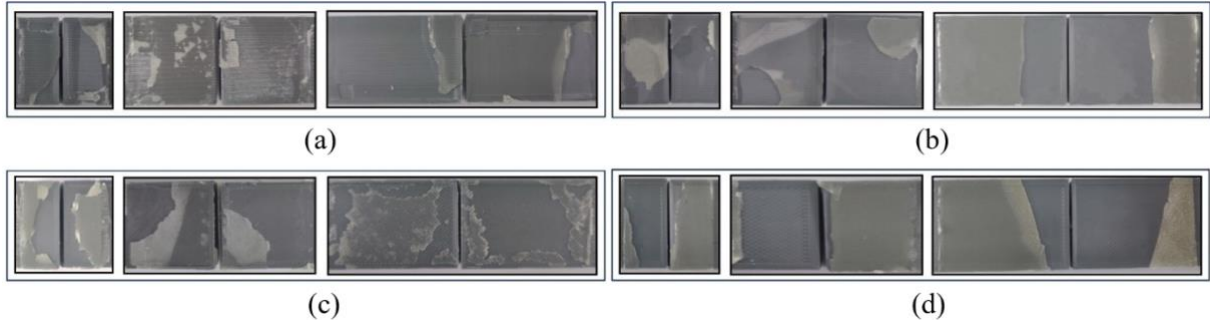
Şekil 6. Bağlantı numunelerinin çekme testi sonuçları; a) %100 dolgu ve 0° baskı açısı, b) %75 dolgu ve 0° baskı açısı, c) %100 dolgu ve 45° baskı açısı, d) %75 dolgu ve 45° baskı açısı

Şekil 6'da verilen sonuçlar incelendiğinde, bindirme uzunluğundaki artışın hasar yükünü artırdığı ancak artış oranının yapıştırılan malzemenin dolgu oranı ve baskı açısına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yapıştırılan malzemelerin dolgu oranı azaldıkça bağlantıların hasar yüklerinin azaldığı Şekil 6'da verilen çekme testi sonuçlarından anlaşılmaktadır. 25 mm bindirme uzunluğuna sahip 0° baskı açısında üretilen %100 ve %75 dolgu oranındaki

numunelerin hasar yükleri kıyaslandığında, %100 dolgu oranına sahip numunenin hasar yükünün %75 dolgu oranına sahip numuneden yaklaşık %21 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer bulgular 45° baskı açısında üretilen numunelerde de görülmektedir. 45° baskı açısında ve %100 dolgu oranında üretilen PLA malzemeler kullanılarak 25 ve 37,5 mm bindirme uzunluğunda birleştirilen bağlantıların hasar yükleri, aynı açı ve bindirme uzunluğundaki %75 dolgu oranına sahip numuneler ile kıyaslandığında, %100 dolgu oranındaki numunelerin sırasıyla yaklaşık %14 ve %16 oranlarında daha fazla olduğu görülmektedir.

Yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri (elastisite modülü) yapıştırma bağlantısının dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Daha yüksek bir elastisite modülü daha yüksek bir dayanım sağlamaktadır. Bununla birlikte, yapıştırma bağlantılarının uç kısımlarında oluşan soyulma gerilmeleri, yapıştırma bağlantılarının dayanımını azaltmaktadır. Soyulma gerilmelerinin minimize edilmesi yapıştırma bağlantılarının performansının artırılması için önem arz etmektedir. Yapıştırılan malzemenin rijitliği arttıkça, yapıştırma bağlantılarının uç kısımlarında meydana gelen soyulma gerilmeleri azalmakta ve bu durum da bağlantıların dayanımını artırmaktadır. Diğer bir ifade ile, yapıştırılan malzemelerin rijitliğindeki artışın, oluşan moment etkisi ile numunelerin dönüşünü azalttığı ve yapıştırıcıdaki gerilmelerin daha düzgün dağılımını teşvik ettiği ifade edilebilir (Reis ve ark., 2011). Tablo 4'te verilen PLA bulk numunelere ait mekanik özellikler incelendiğinde, dolgu oranının azalmasıyla elastisite modülünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar baskı açısının da elastisite modülü üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, bağlantıların hasar yükleri ve yapıştırılan malzemelerin elastisite modülleri birlikte değerlendirildiğinde, dolgu oranı ve baskı açısına bağlı olarak hasar yüklerindeki azalmanın malzemelerin rijitliklerinden kaynaklandığı sonucuna varılabilir. 12,5 mm uzunluğuna sahip bağlantıların hasar yüklerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülürken, 25 ve 37,5 mm bindirme uzunluğuna sahip numunelerin hasar yükleri arasında yüksek farklar meydana gelmiştir. Bindirme uzunluğunun artmasıyla yapıştırma bağlantılarında meydana gelen hasarın soyulma gerilmelerinden kaynaklandığı ifade edilebilir. Elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, %100 dolgu oranı ve 0° baskı açısına sahip bağlantıların daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir.

Yapıştırma bağlantıları için tanımlanan hasar tipleri göz önüne alınarak, yapışma yüzeyleri incelendiğinde, tüm bağlantı numunelerinde büyük oranda yapıştırıcı tabaka ile yapıştırılan malzemenin ara yüzeyi arasında meydana gelen adezyon hasarının meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 7). Ayrıca, yapışma yüzeylerinin bazı lokal bölgelerinde ise özel kohezif hasarın (alt ve üst malzeme yüzeyinde eşit yapıştırıcı miktarının oluşmaması durumu) olduğu görülmüştür. Yapıştırılan PLA malzemeler düşük yüzey enerjisine sahip oldukları için, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında kuvvetli bağ oluşmamaktadır. Bu durumda, yüksek yüzey enerjisine sahip malzemelere kıyasla, daha düşük yüklerde bağlantıların hasara uğramasına sebep olmaktadır.



Şekil 7. Bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri; a) %100 dolgu ve 0° baskı açısı, b) %75 dolgu ve 0° baskı açısı, c) %100 dolgu ve 45° baskı açısı, d) %75 dolgu ve 45° baskı açısı

4. Sonuçlar ve Öneriler

Sunulan çalışmada; eriyik yığıma modelleme (EYM) teknolojisi ile farklı dolgu oranlarında (%100 ve %75) ve baskı açılarında (0° ve 45°) üretilen PLA malzemeler kullanılarak, farklı bindirme uzunluğuna (12,5, 25 ve 37,5 mm) sahip tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiş, PLA malzemelerin ve bindirme uzunluğunun bağlantı numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) PLA malzemelerde dolgu oranı azaldıkça çekme dayanımı ve elastisite modülünün azaldığı, şekil değiştirme değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir.
- 2) PLA malzemelerde baskı açısının mekanik özellikler üzerinde önemli etkisinin olduğu, çekme yönüne paralel (0°) üretilen numunelerde, yükün etkin bir şekilde filamentler aracılığıyla malzeme içerisinde taşınması nedeniyle, en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği belirlenmiştir.
- 3) Yapıştırma bağlantılarının hasar yüklerinin, yapıştırılan malzemenin türüne göre değişiklik sergilediği, %100 dolgu oranında ve 0° baskı açısında üretilen malzemeler kullanılarak üretilen tek tesirli bağlantı numunelerinde en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.
- 4) Yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğunun artmasıyla hasar yüklerinin arttığı, hasar yüklerindeki artış oranının ise yapıştırılan malzemelerin rijitliklerine bağlı olduğu görülmüştür.
- 5) Yapıştırılan PLA malzemeler düşük yüzey enerjisine sahip oldukları için, yapıştırıcı ile çok güçlü bağ oluşturmadığı, büyük oranda adezyon ve bazı kısmi lokal bölgelerde özel kohesif hasarın (karışık modda hasar) meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma konusu geliştirilmeye müsait bir konudur. Bu kapsamda yürütülecek benzer çalışmalarda; PLA numunelerinin üretiminde farklı ekstrüzyon sıcaklıkları, yazdırma hızları, baskı açıları veya dolgu oranları dikkate alınarak daha etkin sonuçlar alınabilir. Ayrıca, PLA filament yerine ABS veya PETG filamentler kullanımı ile yeni araştırmalar hedeflenebilir.

Yazarların Katkısı

KG: Konunun belirlenmesi, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi, makale yazımı, sonuçların yorumlanması, makalenin revizyonu, BÖ: Konunun belirlenmesi, makale yazımı ve incelenmesi, makalenin revizyonu, FY: Numunelerin üretimi, ED: Deneysel çalışmalar, testlerin gerçekleştirilmesi ve numunelerin hazırlanması sürecinin yazımı kısımlarında katkıda bulunmuşlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Algarni, M., (2021). The influence of raster angle and moisture content on the mechanical properties of PLA parts produced by fused deposition modeling. *Polymers*, 13(2), 237.
- Anaç, N., Koçar, O., Hazer, B., (2022). Katmanlı İmalatla Üretilen Parçaların Birleştirilmesinde Yapıştırma Bağlantı Dayanımının İncelenmesi. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 6(3), 449-458.
- Brancewicz-Steinmetz, E., Sawicki, J., Byczkowska, P., (2021). The influence of 3D printing parameters on adhesion between polylactic acid (PLA) and thermoplastic polyurethane (TPU). *Materials*, 14(21), 6464.
- Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., da Silva, L. F. M., Lopes, A. M., (2014). Effect of cure temperature on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 104-119.
- Choudhury, M. R., Debnath, K., (2021). Improving the mechanical performance of resistance-welded green composite joints using different heating elements. *Polymer Testing*, 94, 107059.
- Daminabo, S. C., Goel, S., Grammatikos, S. A., Nezhad, H. Y., Thakur, V. K., (2020). Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems. *Materials Today Chemistry*, 16, 100248.
- Desai, S. M., Sonawane, R. Y., More, A. P., (2023). Thermoplastic polyurethane for three-dimensional printing applications: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 34(7), 2061-2082.
- Dhinakaran, V., Kumar, K. M., Ram, P. B., Ravichandran, M., Vinayagamorthy, M., (2020). A review on recent advancements in fused deposition modeling. *Materials Today: Proceedings*, 27, 752-756.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D., (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Gültekin, K., Korkmaz, Y., (2021). AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Farklı Yüzey Hazırlama Ve Pürüzlülük İşlemlerinin Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1269-1281.

- Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., Akay, O., (2022). Effect of Printing Speed on FDM 3d-Printed Pla Samples Produced Using Different Two Printers. *International Journal of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 6(3), 438-448.
- Kamer, M. S., Temiz, Ş., (2021). 3 Boyutlu Yazıcıda Abs Ve Pla Filamentler İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 341-358.
- Kaygusuz, B., Özeriç, S., (2018). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6.
- Khan, I., Tariq, M., Abas, M., Shakeel, M., Hira, F., Al Rashid, A., Koç, M., (2023). Parametric investigation and optimisation of mechanical properties of thick tri-material based composite of PLA-PETG-ABS 3D-printed using fused filament fabrication. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100392.
- Khosravani, M. R., Soltani, P., Weinberg, K., Reinicke, T., (2021). Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints. *Polymer Testing*, 100, 107262.
- Korkmaz, Y., Gültekin, K., (2023). Improving the mechanical performance of adhesively bonded CFRP composite joints exposed to harsh mediums with the reinforcement of boron nanostructures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(13), 1959-1982.
- Kumar, S., Singh, I. R., Kolor, S. S., Kumar, D., Yahya, M. Y., (2022). On Laminated object manufactured FDM-printed ABS/TPU multimaterial specimens: an insight into mechanical and morphological characteristics. *Polymers*, 14(19), 4066.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D., (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Özer, H., Erbayrak, E., (2016). Experimental investigation on the self-healing efficiency of araldite 2011 adhesive reinforced with thermoplastic microparticles. *Adhesives: Applications and properties*, 169.
- Öz, Ö., Aydın, M., Kara, A. S., Sancak, M. S., (2018). Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Doluluk Oranının Hasar Yüküne Olan Etkisinin Belirlenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 32-39.
- Özsolak, O., (2019). Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14.
- Penumakala, P. K., Santo, J., Thomas, A., (2020). A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108336.
- Polat Çoban, N., Anaç, N., Mert, F., (2023). Eklemeli imalat ile üretilen PLA parçaların yapıştırılmasında yapıştırma parametrelerinin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(3), 1145-1154.
- Rajan, K., Samyano, M., Kadrigama, K., Harun, W. S. W., Rahman, M. M., (2022). Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3-4), 1531-1570.
- Reis, P. N., Ferreira, J. A. M., Antunes, F., (2011). Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(4), 193-201.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., Charitidis, C., (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.
- Zhou, Y., Yang, L., Zou, Q., Xu, S., Ma, M., Ye, C., (2023). A Comparative Applied study on optimizing printing parameters for six fused deposition modeling materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(12), 5249-5260.